



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



Projekt bergvärme

Energiuttag med värmepump ur
bergborrade hål — förstudie

Torgny Agerstrand
Lars O Ericsson

INSTITUTET FÖR
BYGGDOKUMENTATION

Accnr 81-0033

Plac *ser*

Rtd

R172:1980

PROJEKT BERGVÄRME

Energiuttag med värmepump ur
bergborrade hål - förstudie

Torgny Agerstrand
Lars O Ericsson

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
790787-7 från Statens råd för byggnadsforskning
till VIAK AB, Vällingby.

I Byggforskningsrådets rapportserie redovisar forskaren sitt anslagsprojekt. Publiceringen innebär inte att rådet tagit ställning till åsikter, slutsatser och resultat.

R172:1980

ISBN 91-540-3418-3

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm.

LiberTryck Stockholm 1980 059154

INNEHÅLL

	FÖRORD	5
	SAMMANFATTNING	7
1.	ORIENTERING	9
2.	RESULTAT AV FÖRSTUDIE, ETAPP 1	11
2.1	Förstudiens omfattning	11
2.2	Resultat	11
2.2.1	Borrhål	11
2.2.2	Försöksområdets geologiska uppbyggnad	14
2.2.3	Grundvattenförhållanden	20
2.2.4	Grundvattnets kemi	24
2.2.5	Termiska förhållanden	25
3.	FÖRSÖKSUTRUSTNING	29
	REFERENSER	33
Bilaga 1	Värmeomsättningen kring ett borrhål	35
Bilaga 2	Energi ur bergborrhål, beräkningsexempel	39
Bilaga 3	Magasinanalys i en berg- grundsakvifer	43

FÖRORD

Föreliggande utredning utgör redovisning av etapp 1 för projektet BERGVÄRME. Projektet har bedrivits under tiden 1980-01-00--1980-07-20 med anslag från Statens råd för byggnadsforskning. Etapp 1 har omfattat förundersökningar samt förprojektering av försöksanläggning vid Studsvik. Arbetet har genomförts av en arbetsgrupp från VIAK AB och Studsvik Energiteknik AB som utgjorts av följande personer: Torgny Agerstrand (VIAK), Lars O Ericsson (VIAK), Gunnar Gustafson (VIAK), Rutger Roseen (Studsvik), Klas-Göran Spångberg (Studsvik). Värdefulla synpunkter i samband med redovisningen har erhållits av Olof Andersson (VIAK) och Björn Svedinger (VIAK).

Vällingby 1980-07-20

Torgny Agerstrand
Projektledare

SAMMANFATTNING

PROJEKT BERGVÄRME syftar till utveckling av en metod att tillvarata värme ur berget och dess grundvatten. I kombination med värmepump kan metoden användas för uppvärmning av hus i såväl glesbygder som tätorter. Den yttre förutsättningen är tillgång på kristallin berggrund, huvudsakligen urberg, vilket finns i praktiskt taget hela landet. Metoden utvecklas i samarbete av VIAK AB och Studsvik Energiteknik AB.

Systemet baseras på ett 100-150 m djupt borrhål. Ur hålet utvinns värme från berget och dess vattenförande spricksystem. Isbildning i detta vatten beräknas ge ett betydande energi- och effekttillskott. Efter en värmeutvinningsperiod återladdas hålet genom naturligt utbyte med omgivande grundvatten och berg. Vid behov kan återladdningen förstärkas eller påskyndas med hjälp av solfångare.

I föreliggande rapport redovisas projektets första etapp. En försöksplats har etablerats vid Studsvik. Denna består av ett antal borrhål i viss geometrisk utformning. Områdets geologiska, hydrogeologiska och termala förutsättningar har utretts och bildat underlag till en förprojektering av värmetekniska försök, vilka utgör projektets andra etapp.

Försöken förväntas ge både grundvetenskapliga resultat och direkt tillämpbara anvisningar för metodens användbarhet i Sverige.

Programmet för försöken är utformade så att

- teknisk utformning och komponenter kan specificeras
- krav på geologiska, hydrologiska och termiska förutsättningar kan definieras
- eventuell termisk miljöpåverkan skall kunna förutses
- kostnader för anläggning och drift kan beräknas
- tillämpbarheten för system i Sverige kan anges.

1. ORIENTERING

PROJEKT BERGVÄRME syftar till utveckling av en metod för tillvaratagande av värme i berg och berggrundvatten. Metoden skall kunna användas för bostads- och lokaluppvärmning i både glesbygd och tätorter. Den yttre förutsättningen är tillgång på kristallin eller välkonsoliderad sedimentär berggrund, vilket är allmänt förekommande i praktiskt taget hela Sverige. Metoden utvecklas i samarbete av Studsvik Energiteknik och VIAK.

Systemet för bergvärme baseras på ett borrhål till ca 100-150 m:s djup i berggrunden under grundvattennivån. Avsikten är att förbrukningstoppar i energibehovet skall kunna klaras med hjälp av isbildningsvärme. I borrhålet installeras då ett foderrör, som tillsluts nedtill och ansluts med ett cirkulationssystem till en värmepump i den lokal, som skall uppvärmas. Ur grundvattnet i borrhålet och spricksystem i dess närmaste omgivning, utvinns så värme tills isbildning sker i detta vatten. Se figur 1.

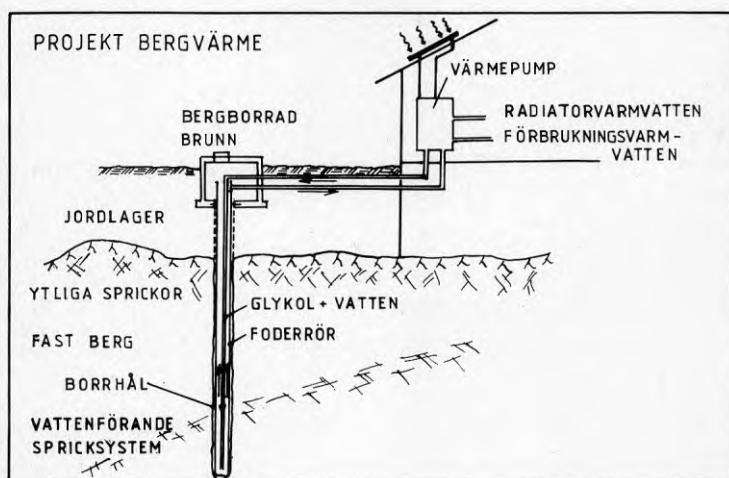


Fig 1 Principskiss över bergvärmesystem

På teoretiska grunder (se bilagorna 1 och 2) kan bergvärme-systemet antas ha goda tillämpningsmöjligheter både vad gäller geografisk lokalisering, tekniskt genomförande och ekonomiskt utfall.

Bland fördelarna med systemet skall framhållas:

1. Systemet är användbart praktiskt taget överallt. Borrhål i berg kan utan större markingrepp utföras i såväl glesbygd som tätbebyggelse.
2. Liten miljöpåverkan. Någon omsättning av grundvatten erfordras inte och således påverkas omgivande grundvattenmagasin endast i mycket liten utsträckning.
3. Den i landet utvecklade hammarborrningstekniken lämpar sig väl för bergvärmesystemet. Ett stort antal borrhningsentreprenörer finns tillgängliga.
4. Genom att systemet medger ett utnyttjande av frysvarme kan effektuttaget sannolikt svara upp mot behovet också under årets kallaste dagar.
5. Eftersom delkomponenterna i systemet redan finns tillgängliga, förväntas utvecklingskostnaden blir låg jämfört med andra energisystem.

Föreliggande rapport utgör redovisning av etapp 1 för projektet BERGVÄRME. Arbetet har bedrivits under tiden 1980-01-01--1980-06-15. Det har omfattat förundersökningar samt projektering av försöksanläggning vid Studsvik och genomförts av en arbetsgrupp från VIAK AB och Studsvik Energiteknik AB. Samarbete har etablerats med BFR-projektet "Ingenjörsgelogisk loggning av kristallin berggrund" samt med jordvärmegruppen vid Chalmers Tekniska Högskola.

För projekt BERGVÄRME har till BFR tidigare ställts två stycken ansökningar om projektanslag, daterade 1980-09-12, samt 1979-05-14, som underlag för beslut om genomförande av etapp 1.

2. RESULTAT AV FÖRSTUDIE, ETAPP 1

2.1 Förstudiens omfattning

Syftet har varit att upprätta en försöksplats för att kunna testa bergvärmesystemet i praktiskt utförande.

Som försöksplats valdes ett område inom Studsvik Energiteknik AB (figur 2). Här har fem borrhål utförts med förutbestämd inbördes geometri. Ett av dessa fungerar som värmeväxlare med berget, övriga utgör observationshål.

I förundersökningen har försöksområdet dokumenterats avseende geologisk uppbyggnad och rådande grundvattenförhållanden. Detta har skett med hjälp av geologisk dokumentation av borrhålen respektive provpumpning. De termiska förhållandena har kartlagts med hjälp av temperaturmätningar i borrhålen. Grundvattnets beskaffenhet har slutligen analyserats.

Ett speciellt intresse har ägnats olika möjligheter att ta tillvara på isbildningsvärmets vid nedfrysning av borrhålet. Den värmemängd som frigörs vid isbildning kan teoretiskt utnyttjas på motsvarande sätt om i konventionella yttjordvärmesystem. Effekterna av den volymsökning som inträder vid isbildningen måste dock vidarestuderas genom noggranna mätningar under försök i full skala för att kunna verifiera teknikens möjligheter.

På grundval av erhållna resultat har en förprojektering gjorts av pilotanläggningens försöksutrustning. Denna innefattar dels värmesystemets komponenter såsom värmepump, värmeväxlare, solfångare m m och dels utrustning för temperatur- och flödesmätningar under försökens gång.

2.2 Resultat

2.2.1 Borrhål

Fem borrhål har utförts, fyra i berg och ett i jordlager. Borrhålens läge framgår av figur 3.

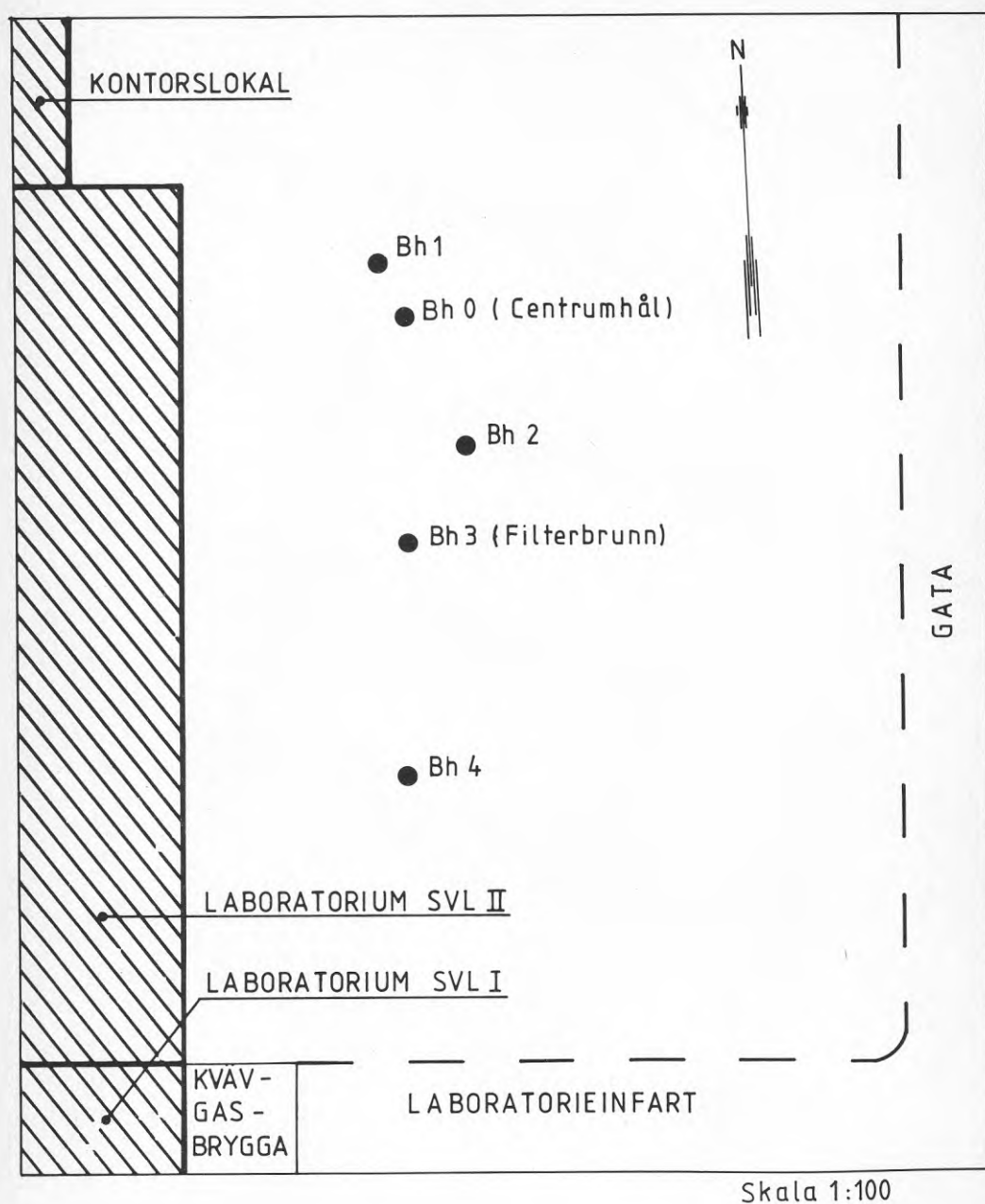


Fig 3 Planskiss över försöksområdet

Borrningsarbetena i jordlagren utfördes med Odexborrning, varefter tryckluftsborrning med borrhammare användes i berget. Foderrören från odexborrningen nedfördes ca 2 m i berget och tätning mellan jordlagren och bergborrhålet utfördes med cementinjektering.

Centrumhålet, Bh 0, borrades i berget med dimensionen \emptyset 150 mm och de övriga bergborrhålen Bh 1, Bh 2, Bh 4 borrades med dimensionen \emptyset 115 mm. Det 1 m långa filtret i jordlagerbrunnen utformades med kontinuerlig slits (JWS 1,5 mm slitsvidd och \emptyset 89 mm). Data om borrhålen framgår i övrigt av nedanstående tabell. Se även figur 8.

Tabell 1 - Borrhålsdata

Borrhål	Formation	Avstånd (m) fr Bh 0	Plus-höjd (möh)	Djup till berg (m)	Totalt djup (m)	Foder-rörs-längd (m)	Dim (mm)	Arm
Bh 0	Berg	0	24,70	21,8	100,4	26,0	150	x
Bh 1	Berg	1,05	24,71	21,75	51,5	24,0	115	xx
Bh 2	Berg	2,60	24,65	21,0	60,4	24,0	115	
Bh 3	Jord	4,15	24,76	—	20,8	19,8	89	
Bh 4	Berg	8,30	24,73	21,0	60,3	24,0	115	

x = Sten och borrhax 97-100,4; kaliper \emptyset 140 mm fast 66-68 urök

xx = Inborrat i Bh 0, träplugg 47,1 - 47,8 m; cement 46,2 - 47,1 m urök; otät infästning av foderrör mellan jord och berg

Vid borrningen avvek borrhålen från lodlinjen mer än vad som förutsatts. Bh 1 borrades in i Bh 0 ca 51,5 m under markyta och tätning utfördes i botten av Bh 1 med träplugg och cement. En preliminär deviationsmätning genomfördes av SGU för att klarlägga borrhålens riktning och

krökning. Det har emellertid visat sig att de föreliggande mätresultaten endast är tillförlitliga vad gäller krökningen. Magnetiska störningar (bl a foderrör) har givit stora avvikelser vad avser riktningen. Avvikelsen från lod-linjen i borrhålen på några olika djup framgår av tabell 2.

Tabell 2 - Ackumulerade radiella avvikelser (m) från lodlinjen för borrhålen på olika djup

Borrhål	15 m	25 m	35 m	45 m	55 m	95 m
Bh 0	0	0	0,12	0,38	0,87	4,16
Bh 1	0,06	0,28	0,28	0,28	-	-
Bh 2	0	0	0,22	0,74	1,33	-
Bh 3	0	-	-	-	-	-
Bh 4	0	0,07	0,73	1,85	3,20	-

2.2.2 Försöksområdets geologiska uppbyggnad

För att utreda försöksområdets geologiska uppbyggnad har inledningsvis en litteraturstudie utförts. Härefter har en flygbildstolkning gjorts med en efterföljande fältkartering. Slutligen togs prover och utfördes annan dokumentation under borrhningarna. (Landström O et al, 1978)

Jordlagren

Studsviksområdet är beläget i en av de sydligaste sk mellansvenska randmoränstråken. Avlagringar som tillhör denna randzon kan följas från Näslandet ca 5 km norr om Oxelösund över Hånömogen, Studsvik till Tyvudden. Inom zonen påträffas flera större isälvsavlagringar med inlagrade moränbäddar. Försöksområdet ligger inom denna zon, se figur 4.

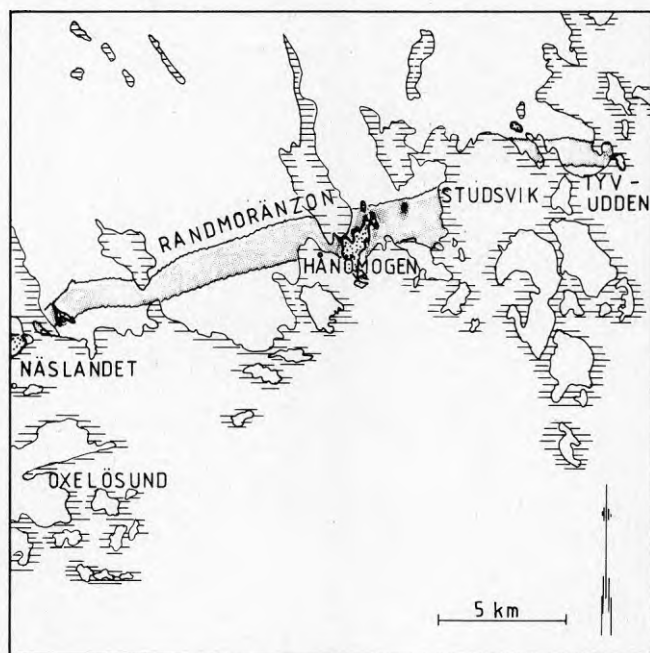


Fig 4 En randmoränzon sträcker sig från Näslandet österut över Hånömogen, Studsvik till Tyvudden

Borrningarna visade att jordlagrens mäktighet inom försöksplatsen är ca 22 m. Lagerföljden är komplext uppbyggd med växellagring av morän- och grovsediment, se figur 5. Av intresse är en ca 10 m mäktig sekvens med grus och sand, vilken bildar ett grundvattenmagasin som har direktkontakt med underliggande berggrund. (Se även Caldenius, 1956.)

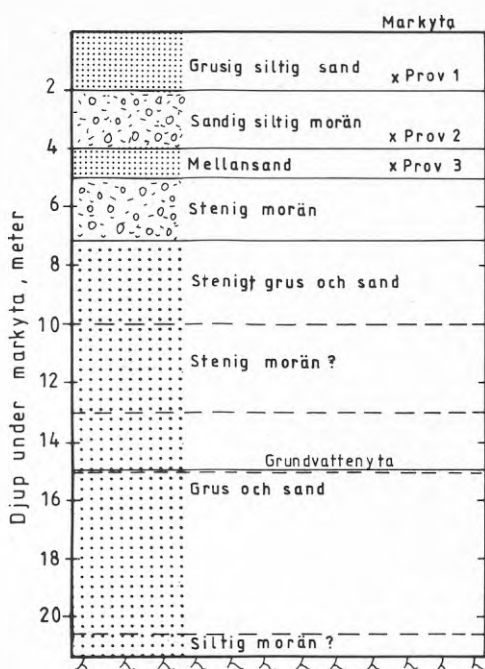


Fig 5 Jordlagerföljden vid försöksplatsen

Berggrunden

Berggrunden i Studsviksregionen består huvudsakligen av en ospecificerad sedimentgnejs av svekofennisk ålder (1800-2000 milj år) samt något yngre intrusiva bergarter, främst granodiorit. Sedimentgnejsen uppvisar stark migmatitisering och ådergnejsomvandling och granater förekommer. Även granodioriten är migmatitiserad och ådergnejsomvandlad. I närheten av en mylonit- och brecciazon, som stryker i nordvästlig riktning ca 2 km väster om forskningsområdet, påträffas diabasgångar av jotnisk ålder (1200-1300 milj år). En översiktlig berggrunds-karta framgår av figur 6.

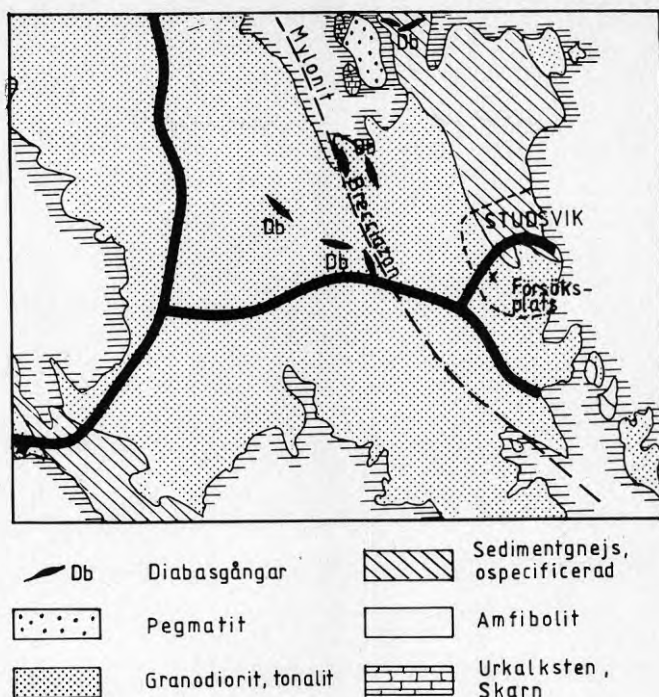


Fig 6 Översiktlig berggrundskarta för Studsviksregionen (efter SGU, 1976)

Den dominerande sprickriktningen i regionen är nordvästlig, samma som mylonit-brecciazonens och diabaser-nas riktning. Denna sprickriktning har gett upphov till flera långsträckta dalstråk och sund.

De nordvästliga sprickorna har uppstått genom skjuvning och deras dominans i Studsviksregionen beror av att de sammanfaller med skiffrihetsplanen. En tektonisk analys av ett hållområde ca 500 m öster om försöksplatsen visar att förutom den nordvästliga sprickbildningen förekommer också brant stående sprickor med nordöstlig strykning. Figur 7 visar översiktligt den tektoniska bilden i området. Vidare framgår skiffrihetens riktning och stupning.

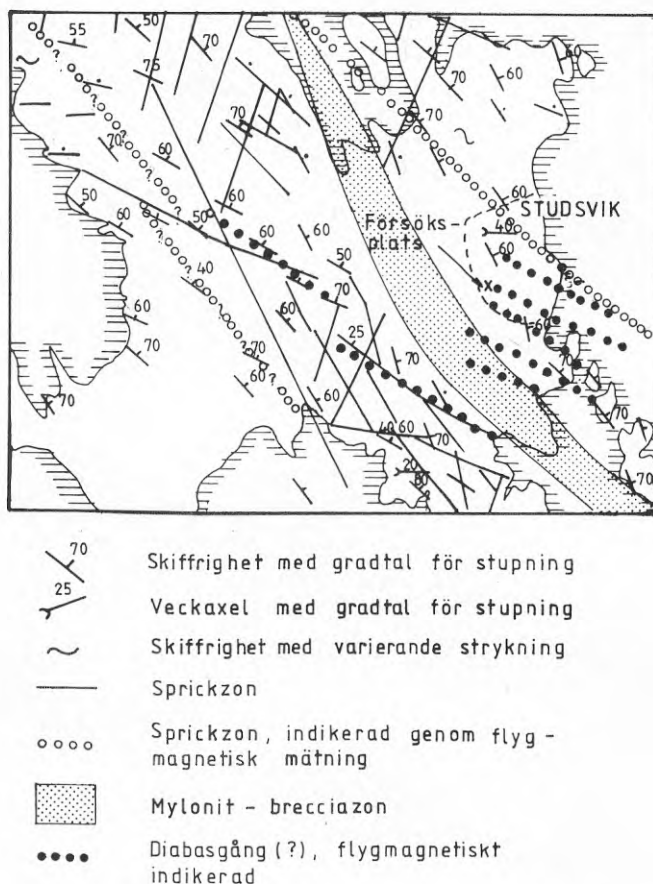


Fig 7 Översiktlig tektonisk karta över Studsviks-regionen (efter SGU, 1976)

Analys av borrhaxprover visar att berggrunden inom försöksplatsen består av granodiorit med inslag av pegmatit. Pegmatiten uppträder främst som större sammanhängande gångar men också i form av tunnare sliror i dioriten, se figur 8.

Under borrhningarna registrerades den relativa borrhsjunkningen, som sjunkningstid per 20 cm borrhning. Tidigare noterades nivåer där vatteninträngning skedde under borrhningens gång. Sammantaget visar dessa data var i lagerföljden sprickor, svaghetszoner och bergartsgränser finns.

De uttolkade resultaten i en preliminär bedömning framgår av figur 8.

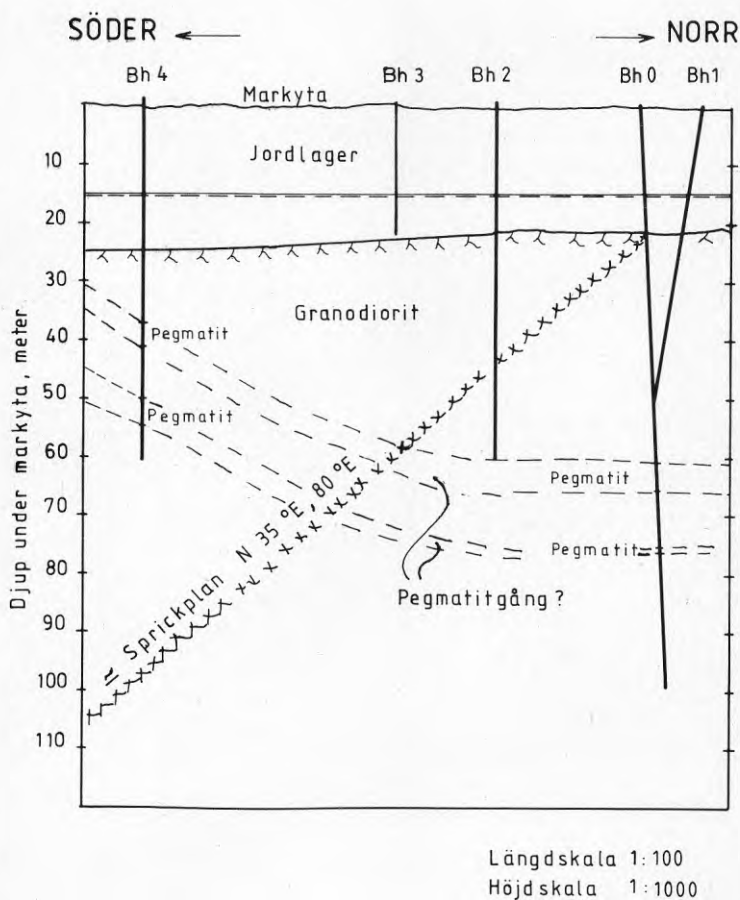


Fig 8 Preliminär bedömning av berggrunden vid försöksplatsen

En kompletterande studie med hjälp av geofysisk borrhålsloggning i inledningen av projektetapp 2 kommer att ytterligare klargöra de lokala geologiska förhållandena.

2.2.3 Grundvattenförhållanden

Hur grundvattnet uppträder inom försöksområdet har dokumenterats främst genom provpumpning. Till viss del har även kapacitetstester under borrhingsarbetet arbetats in i analysen.

Den mätutrustning och det förfaringssätt som användes vid provpumpningen framgår av figur 9. Metoden medger möjlighet att registrera snabba hydrauliska avsänkingsförlopp vid provpumpningens början, vilket ger möjlighet till vittgående analyser och tolkningar. Se bilaga 3.

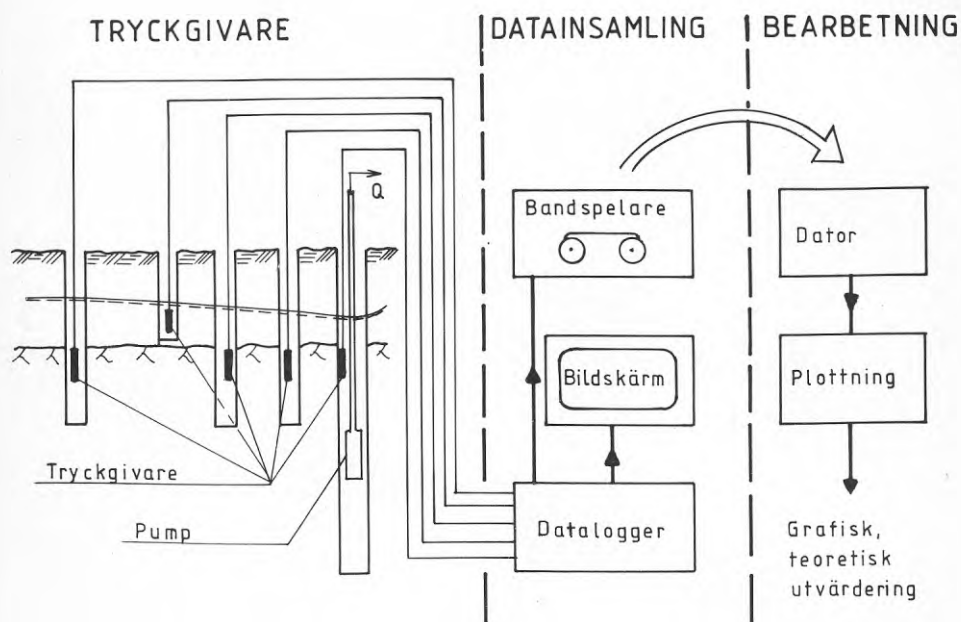


Fig 9 Provpumpningsutrustningens principiella utseende

Provpumpningen genomfördes under två dygn med början 1980-04-22. Ur Bh 0 pumpades med en konstant kapacitet motsvarande $1,63 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ samtidigt som nivåförändringarna registrerades med tryckgivare och data-logger enligt figur 9.

Före, under och efter pumpningen registrerades också meteorologiska data (nederbörd och lufttryck) för korrigering vid utvärdering av pumpdata.

Avsänkingsdata från pumpningen framgår av figur 10, plottat i log-log diagram.

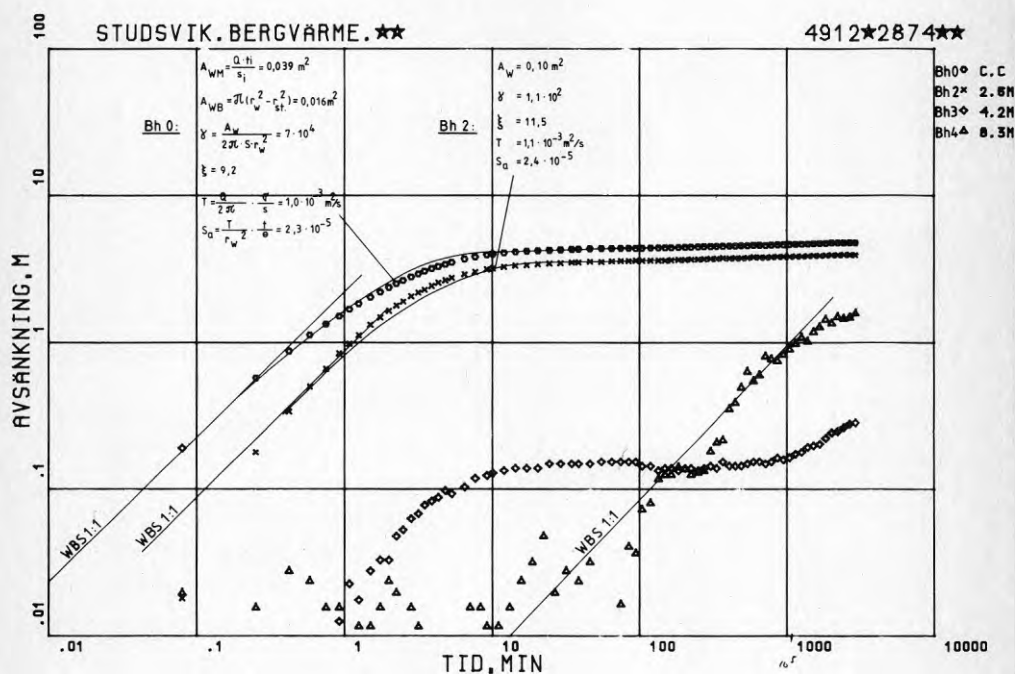


Fig 10 Plottning och utvärdering av provpumpningsdata i log-log diagram

De ur provpumpningsdata framräknade värdena för Bh 0 och Bh 2 på genomsläpplighet (T), magasineringsförmåga (S) och brunnsegenskaper (ξ) framgår av tabell 3. För definition av de hydrauliska parametrarna samt teori i övrigt vad avser provpumpning och magasinanalys hänvisas till bilaga 3.

Tabell 3

	Transmissivitet T m ² /s	Magasinskoeff S %	Skinfaktor ξ
Bh 0	1.0-1.1 · 10 ⁻³	1.1 · 10 ⁻⁵	9.0
Bh 2	1.1-1.2 · 10 ⁻³	2.4 · 10 ⁻⁵	11.5

Data från de tre övriga borrhålen uppfyller inte kraven för att de hydrauliska parametrarna skall kunna beräknas.

Bh 1

Under pumpning erhöles efter 700 min stigande vattenstånd. Detta är en följd av otät infästning mellan jordlager och berggrund.

Bh 3

Filterbrunnens reaktion visar ett läckagesamband mellan jordlagermagasinet och bergsprickorna. Brunnen reagerar med fördröjd vattenavgivning.

Bh 4

I början av pumpningen visar reagensen ett oregelbundet förlopp för att efter ca 100 minuter övergå i ett mer normalt avsänkingsförlopp. Detta borrhål uppvisar då en tömning av brunnsmagasinet. Avsänkingshastigheten i relation till flödet från akviferen är för stort och det är först vid slutet av pumpningen som observationshålet följer ett avsänkingsförlopp motsvarande en brunnsfunktion.

Grundvattenförhållandena kan sammanfattas på följande vis:

Grundvattennivån i jordlagerakviferen är belägen ca 15 m under markytan eller på nivån +9,7 m över havet och den sammanfaller med grundvattnets trycknivå i bergborrhålen. Det öppna kvartära grundvattenmagasinet står i god hydraulisk kontakt med bergakviferen via öppna huvudsakliga vertikala spricksystem. Två dominerande strykriktningar för vattenförande sprickor och sprickzoner har iakttagits, nämligen N 30 °W samt N 35 °E (se figur 11).

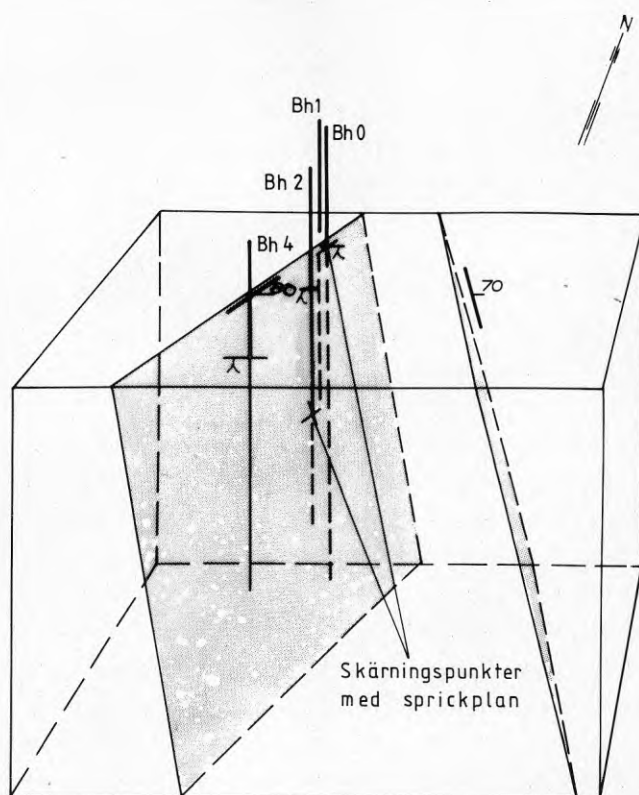


Fig 11 Översiktlig principiell skiss av de dominerande sprickplanen och deras relation till bergborrhålen

På grund av hög positiv skinfaktor uppstår vissa svårigheter att bestämma tektoniska förhållanden utifrån provpumpningen. Resultaten av provpumpningen har emellertid visat att:

- de fyra bergborrhålen har hydraulisk kontakt med varandra via öppna sprickor i berget
- en mycket god hydraulisk förbindelse finns mellan Bh 0 och Bh 2 via en större vertikal spricka
- ett direkt läckagesamband finns mellan jordlagrens och berggrundens grundvattenmagasin, sannolikt via berggrundens ytsprickighet.

Efter värmetekniska försök, t ex infrysning, finns härmed goda förutsättningar att utvärdera de förändringar i de hydrauliska egenskaperna som kan erhållas i centrumhålet och dess närmaste omgivning.

2.2.4 Grundvattnets kemi

Grundvattnets beskaffenhet har analyserats både före och efter provpumpningen.

Berggrundvattnet i naturligt tillstånd har en hög total salthalt, se figur 12 överst (Bh 0). Detta pekar på en låg vattenomsättning.

Underst i figuren visas jonbalansen för grundvattnet i jordlagren (Bh 3). Jämfört med berggrundvattnet innehåller detta en lägre halt lösta joner, samtidigt som det är av yngre ålder ($\text{pH} - \text{pK} = 3,7 < 4,0$).

Under pumpningen "drogs" vatten från jordlagren in i berggrunden och ett blandvatten erhöles, se mitten i figuren. Detta förhållande understryker att en direkt hydraulisk kontakt finns mellan jordlagrens och berggrundens vattenmagasin.

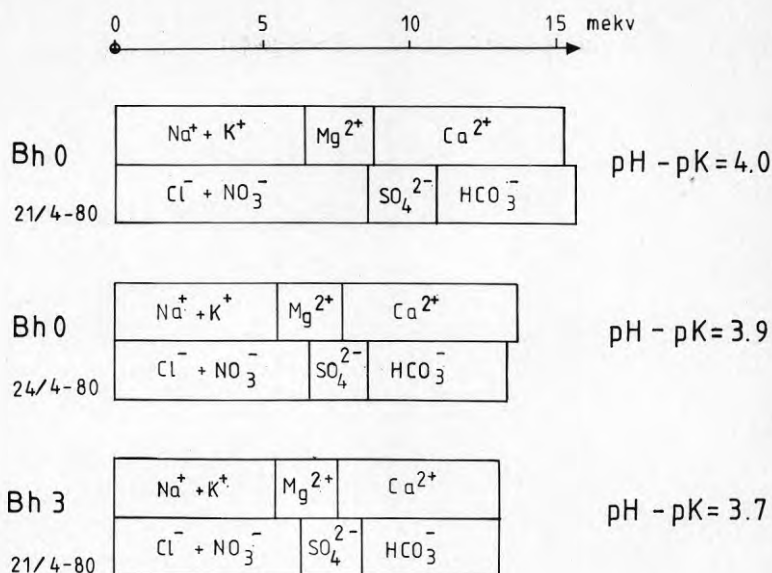


Fig 12 Jonbalans för vattenanalyser i Bh 0 och Bh 3

2.2.5 Termiska förhållanden

För att bestämma bakgrundsvärdena inför den andra etappens värmeutvinningsförsök uppmättes områdets temperaturprofil. Mätningarna utfördes med en termistor-borrhåls-termometer utarbetad vid Geofysisk Laboratorium, Århus Universitet (Landström, O. et al, 1979). Absolutfelen har bestämts till $\pm 0,06$ °C och de relativa felen är $\pm 0,004$ °C. Förutom temperaturmätningar i naturligt tillstånd studerades temperaturförändringen i Bh 1 under samtidig pumpning i centrumhålet (Bh 0).

Temperaturloggningen i Bh 0 ca 3 veckor efter pumpning framgår av figur 12. Loggningen visar en hög utgångstemperatur (~ 9 °C), vilken sedan avtar mot djupet och når sitt lägsta värde på 65-metersnivån. Från och med denna nivå följer sedan temperaturen den geotermiska gradienten.

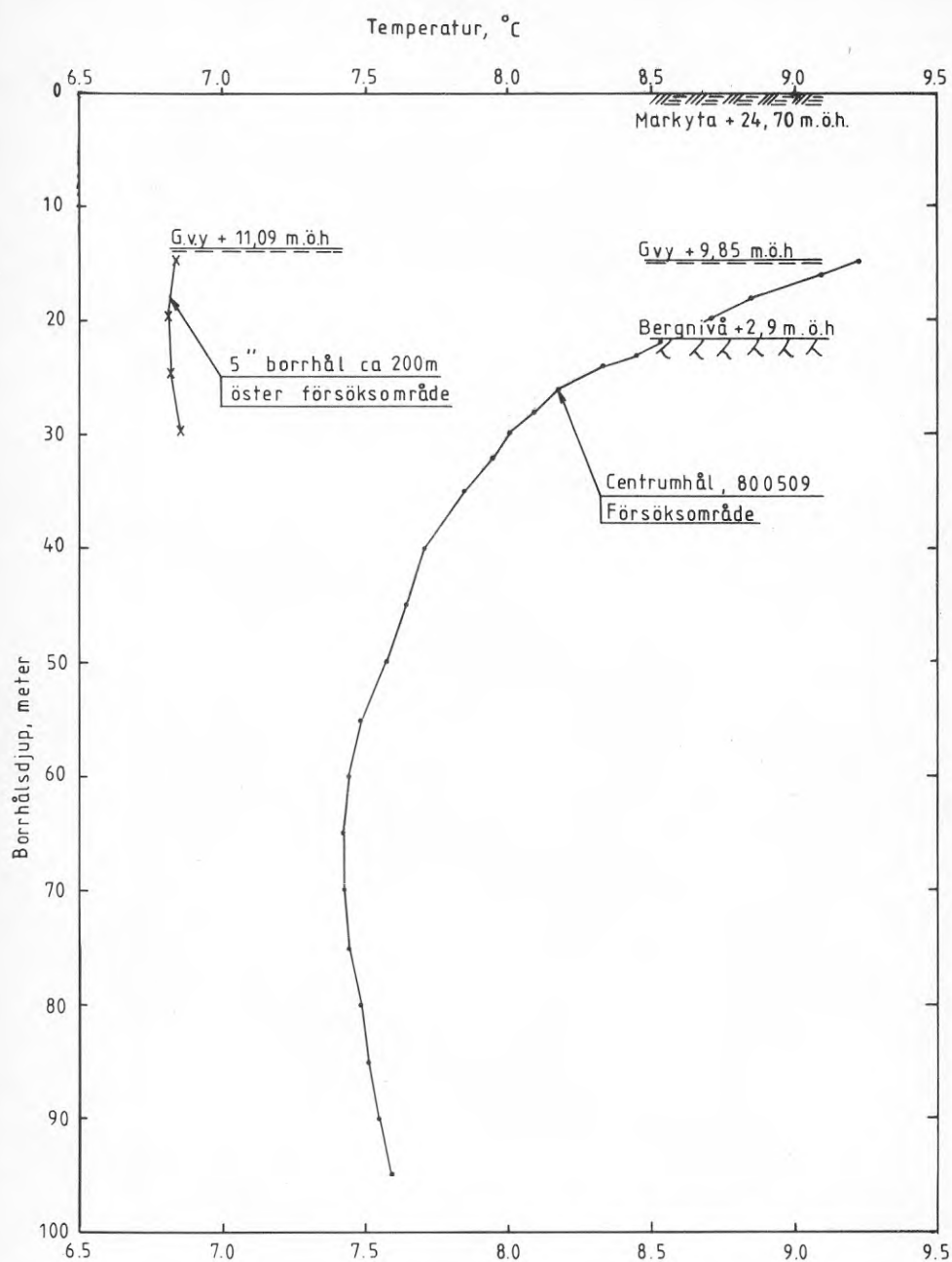


Fig 12 Temperaturen vid försöksplatsen och i ett borrhål 200 m i östlig riktning.

Som jämförelse visas också i figuren resultatet av en loggning av ett bergborrhål ca 200 m från försöksplatsen. Detta har en för breddgraden normal begynnelstemperatur strax under 7 °C och antydan till påträffad geotermisk gradient redan på 25-metersnivån.

Temperaturläget i Bh 0 är med största sannolikhet stört av en fjärrvärmekulvert som ligger i anslutning till undersökningsområdet. En översiktlig icke-stationär beräkning med extrapolationsmetod i lin-log diagram (se figur 13) resulterar i en cylinderformad oändlig värmekälla med ett värmeläckage av ca 40 W/m. Det har också gått att beräkna att värmekällan har varit i drift under minst 15,8 år.

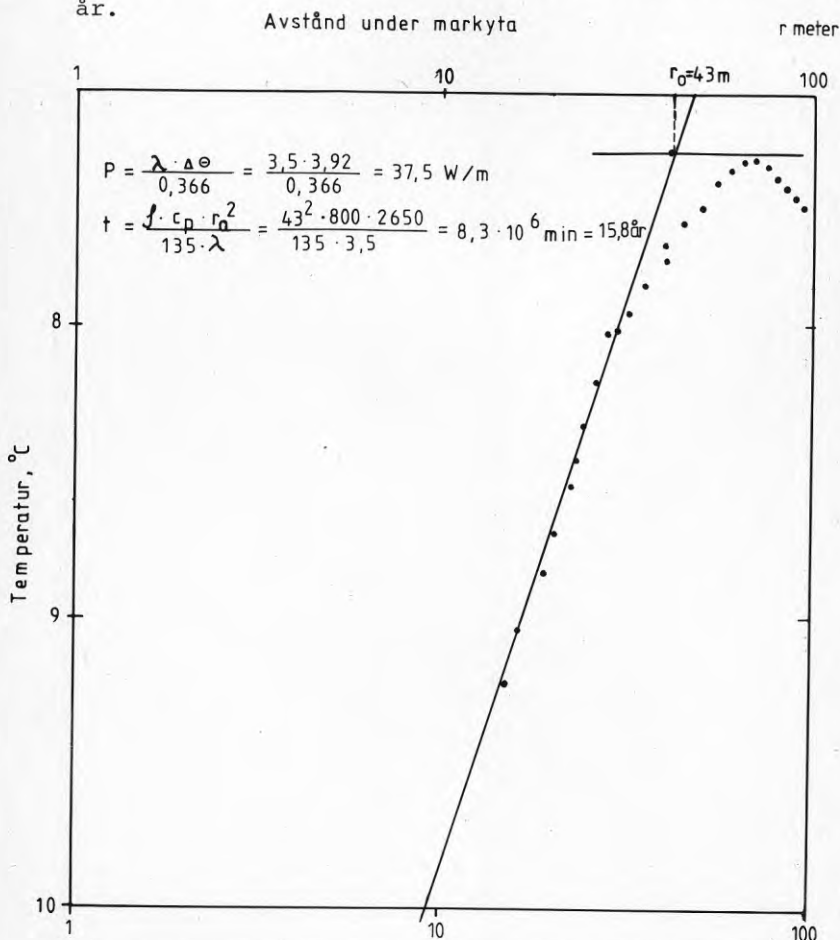


Fig 13 Icke-stationär beräkning av effektförlust från fjärrvärmekulvert och verksam drifttid genom extrapolationsmetod i lin-log diagram

I avsikt att förklara den stigning av grundvattennivån i borrhål 1, som erhöles under provpumpningen (se avsnitt 2.3.3) studerades temperaturförändringen i borrhålet under pågående pumpning i centrumhålet. Som framgår av figur 14 förhöjdes temperaturen i medeltal med ca $0,2^{\circ}\text{C}$ mellan nivåerna 15-26 m. Vid foderrörets anslutning i berget erhöles ytterligare förhöjningar av temperaturen. Detta försök visar att det föreligger en kommunikation mellan grundvattenmagasinet i jordlagren och det öppna hålet i berget, vilket innebär att den cementinjekterade infästningen av foderröret är otät. Inför värmeutvinningsförsöken bör en ny tätning utföras.

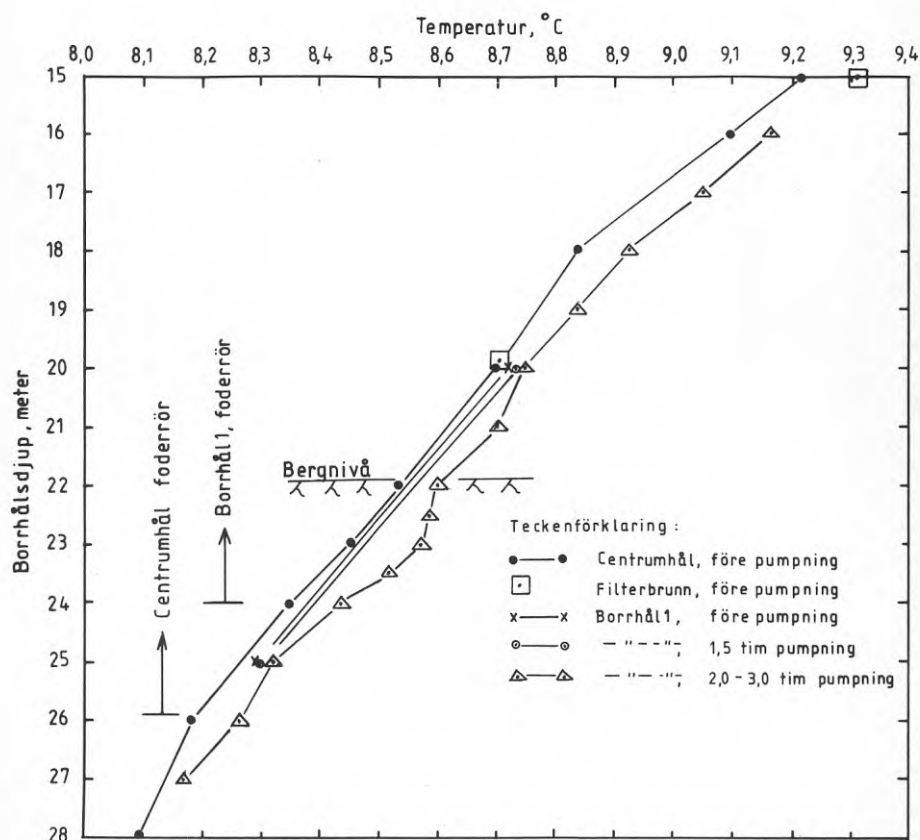


Fig 14 Temperaturmätning i Bh 1 under samtidig pumpning i Bh 0

3. FÖRSÖKSUTRUSTNING

Inom ramen för denna etapp av forskningsuppgiften har även en förprojektering av försöksutrustningen genomförts. Den utrustning som måste anskaffas för de värmetekniska experimenten är av två slag:

A. Driftkomponenter såsom pumpar, ledningar, värmepump
m m

B. Mätutrustning

Utrustning A är skisserad i figur 25. I försöksutrustningen ingår ett isolerat förrådskärl (4) för en brine av t ex glykol-vattentyp. Kärlet är avsett som buffert mellan värmepumpen (5) och borrhålssystemet, eftersom den förra är inköpt för ett annat projekt och har för stor effekt. Temperaturen kan i förrådskärllet läggas på önskad nivå och effekten i övrigt regleras över den varvvalsreglerade pumpen.

Foderröret (1) kommer att bestå av t ex stål eller polyeten. Det är nästan fyllt till marknivån med brine för att pumpen skall klara sughöjden. Foderröret utgör således värmeväxlare mot berg-vatten-systemet. Två klenare plaströr nedsticks för uttag och återföring av brine och skall ge möjlighet att variera omsättningen av denna i foderröret.

Punkt (3) är en solfångare eller "kondensinfångare". En enkel styrning av vätskehastigheten genom anordningen blir förmodligen nödvändig för att få bästa verkningsgrad.

En vattenkyld värmeväxlare (6) representerar värmeförbrukaren i försöket.

Mätutrustningen, B, består av givare för mätning av temperatur (T) och flöden (F) samt datainsamlingssystem.

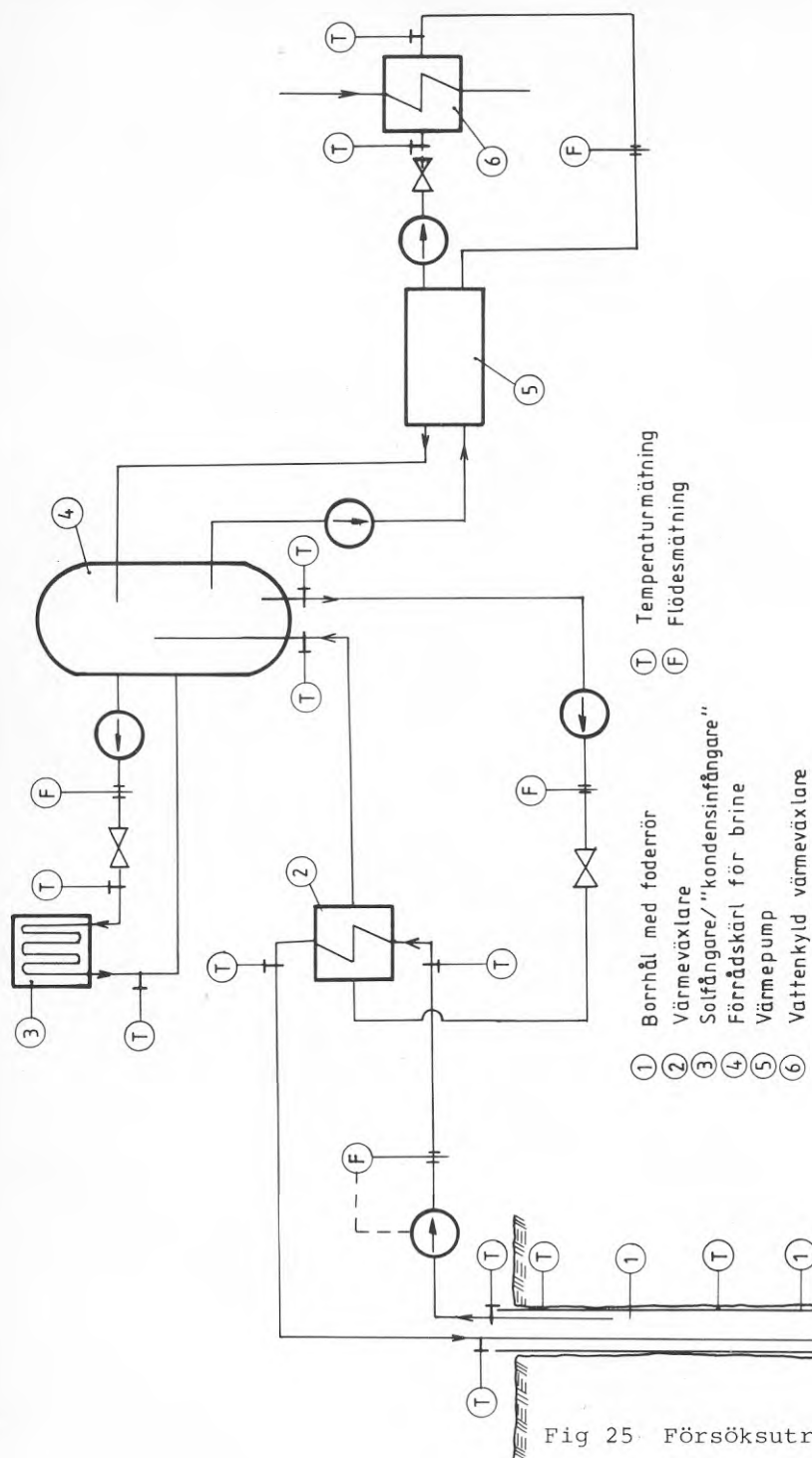


Fig 25 Försöksutrustning

Eventuellt installeras en utrustning som styr värmeuttag och värmetillförsel. Givarna placeras i huvudsak i de fem borrhålen.

Med erfarenhet från tidigare mätförsök insätts temperaturgivare i borrhålen på ungefär var femte meter och vid vattenlinjen, där de får ökas i antal. I det översta avsnittet nära markytan kan temperaturmätningar vara svåra att utföra, eftersom luften i mätålen troligen kommer att konvektera vintertid, när marken nedkyls och man får omvänd temperaturgradient. För att förhindra och dämpa dessa rörelser kan marken isoleras runt hålen. Detta bedöms förändra randvillkoren till maximalt 2-3 m under markytan.

Temperaturmätningar i uttagshålet bör inte ske i brinedelen, eftersom man där har att räkna med kraftiga konvektionsrörelser. Mätningarna förläggs eventuellt i kläna plaströr mellan foderrör och bergvägg. Givarna bör vara åtkomliga även under frysörsöken, varför eventuella glykolfyllda plaströr kan behöva användas.

Med hänsyn till osäkerheten om hur snabba temperaturförloppen blir, kan det vara nödvändigt att utföra ytterligare ett borrhål i samband med de värmetekniska försöken. Detta hål placeras då så att gradienterna bättre kan följas upp.

Målsättningen med mätningarna är att utvärdera och bedöma:

- vilka totala energi- och effektuttag som är möjliga med bergvärmekniken
- frysvärmets betydelse för främst det kortvariga effektuttaget
- influensradiens spridning runt värmeväxlarhålet
- hur berget och berggrundens vatten påverkas av frysningsprocessen

- vilken inverkan jordlagren och jordlagrens grundvatten har på värmeutbytesprocesserna i berget
- systemkomponenternas funktion och driftstekniska egenskaper

Försöksprogrammet omfattar:

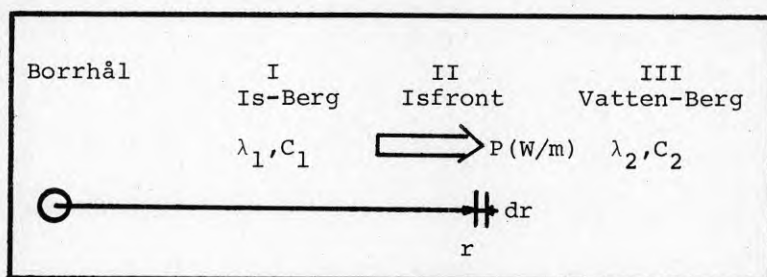
- kompletterande borrhålsloggning
- termiska parametrar bestäms bl a via mineralbestämning av borrhaxprover
- test av beräkningsmodell
- detaljprojektering av försöksanläggning
- anläggning och installation av utrustning
- genomförande med olika effekt- och energiuttag
- hydraulisk kontroll av berggrundens egenskaper efter frysning
- undersökning av frysningsprocessernas inverkan på borrhålsväggarna
- modifiering av beräkningsmodell
- systemanalys.

REFERENSER

- Caldenius, C, 1956. Grundförhållanden inom byggnadsområdet vid Studsvik. Utlåtande. Stockholm 1956
- Caldenius, C, 1956. Kompletterande undersökningar rörande markbeskaffenhet och grundvattenförhållanden inom byggnadsområdet vid Studsvik. Utlåtande. Stockholm 1957
- Landström, O, et al, 1978. In situ experiments on nuclide migration in fractured crystalline rocks
KBS-rapport 110. Studsvik 1978
- Landström, O, et al, 1979. Värmefflöde i berg.
Slutrapport för NE-projekten 4560014-015.
Chalmers tekniska högskola. Geologiska institutionen.
Publ B 137. Göteborg 1979
- SGU Serie Ae, Nr 12, 1973. Beskrivning till geologiska kartbladet, Nyköping SO. Stockholm 1973
- SGU Serie Af, Nr 114, 1976. Beskrivning till berggrundskartan, Nyköping SO. Stockholm 1976

BILAGA 1 - Värmeomsättning kring ett borrhål

Om värmeöverföringen i berggrunden enbart antas ske genom ledning erhålls följande betraktelse. Värmeflödet radiellt mot ett borrhål under förutsättning av temperatur lägre än 0°C styrs av tre förlopp, d v s värmeledning genom is-berg media (I), isfrontens tillväxthastighet i det vattenfyllda spricksystemet (II) och värmeledning i omkringliggande vatten-berg-media (III). Se figur 1.



Figur 1: Värmeflödet till ett bergborrhål.

För värmeledning genom is-berg media gäller (per längdmeter):

$$\text{I: } \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial r} = \frac{C_1}{\lambda_1} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

- λ_1 - värmeledningstal berg-is (W/m, $^{\circ}\text{C}$)
- C_1 - specifik värmekapacitet per volymenhet berg-is (J/m^3 , $^{\circ}\text{C}$)
- θ - temperatur ($^{\circ}\text{C}$)
- r - radie från borrhålscentrum (m)
- t - tiden (sek)

För värmeledning genom vatten-berg media gäller:

$$\text{III: } \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} = \frac{C_2}{\lambda_2} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2)$$

λ_2 - värmeledningstal vatten-berg (W/m, °C)

C_2 - specifik värmekapacitet per volymenhet vatten-berg (J/m³, °C)

I de fall där sprickvolymen är liten dominerar de värmeledande förutsättningarna av bergartens värmeledningstal och specifika värme, d v s $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_{\text{berg}} = \lambda$ och $C_1 = C_2 = C_{\text{berg}} = C$.

Ekvation (1) och ekvation (2) kan då skrivas:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} = \frac{C}{\lambda} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (3)$$

Lösningen av ekvation (3) kan erhållas på följande sätt: Temperaturförändringen är $\Delta\theta = \theta - \theta_0$.

$$\Delta\theta = \frac{P}{4\pi\lambda} W(u) \quad (4a)$$

$$W(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-x}}{x} dx \quad (4b)$$

$$u = \frac{r^2 C}{4 \cdot \lambda \cdot t} \quad (4c)$$

Funktionen $W(u)$ kan serieutvecklas på följande vis:

$$W(u) = -0,5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \dots \quad (5)$$

För små värden på u , d v s långa tider eller korta avstånd, reduceras $W(u)$ till:

$$W(u) = - 0,5772 - \ln u \quad (6)$$

Ekvation (3) har alltså en approximativ lösning

$$\Delta\theta = \frac{P}{4 \pi \lambda} \left(-\ln \frac{r^2 \cdot C}{4 \cdot \lambda \cdot t} - 0,5772 \right) \quad (7)$$

Förloppet som styr isens tillväxthastighet vid isfronten (zon II) är mer komplicerat. Från volymen dröj frigörs vid isfronten isen - bergets värmekapacitet och framförallt isbildningsvärmets, vilket skall ledas till borrhålet. I samband med modellarbete finns anledning att närmare studera dessa förlopp.

BILAGA 2 - Energi ur bergborrhål, beräkningsexempel

I detta beräkningsexempel förenklas förutsättningarna för energiutvinning på följande vis:

Energibehovet över året antas till 15 000 kWh för en enfamiljsvilla, ca 100 m². Energibehovet tillgodoses med värmepump vars värmefaktor förutsätts vara lika med 3/1, dvs 10 000 kWh skall tillgodoses via energi från borrhålet. Den månadsvisa energiförbrukningen framgår av figur 1.

I exemplet studeras förhållanden utan frysning. Den ursprungliga grundvattentemperaturen generaliseras till $\theta_0 = 7^\circ\text{C}$ längs hela borrhålet. Borrhålets längd sätts lika med 100 m och dess radie lika med $r_w = 0,075$ m.

Ekvation (2) har en approximativ lösning:

$$\theta_0 - \theta = \frac{P}{4\pi\lambda_2} \left(-\ln \frac{r_w^2 \cdot \rho \cdot c_2}{4 \cdot \lambda_2 \cdot t} - 0,5772 \right) \quad (8)$$

Vid stationärt tillstånd:

$$\theta_0 - \theta = \frac{P}{2\pi\lambda_2} \ln \frac{R_0}{r_w} \quad (9)$$

P är effektuttaget som totalt blir 1,4 kW för oktober, november, mars och april respektive 2,8 kW för december, januari, februari. Per borrhålsmeter blir motsvarande effektuttag 14 respektive 28 W/m. Värmeledningen $\lambda_2 = \lambda_{\text{berg, vatten}} = 3,5$ W/m, °C. Specifika värmekapaciteten per volymsenhet är $C_2 = \rho \cdot c_2 = 1000 \cdot 2,65 \cdot 10^3 = 2,65 \cdot 10^6$ J/m³, °C.

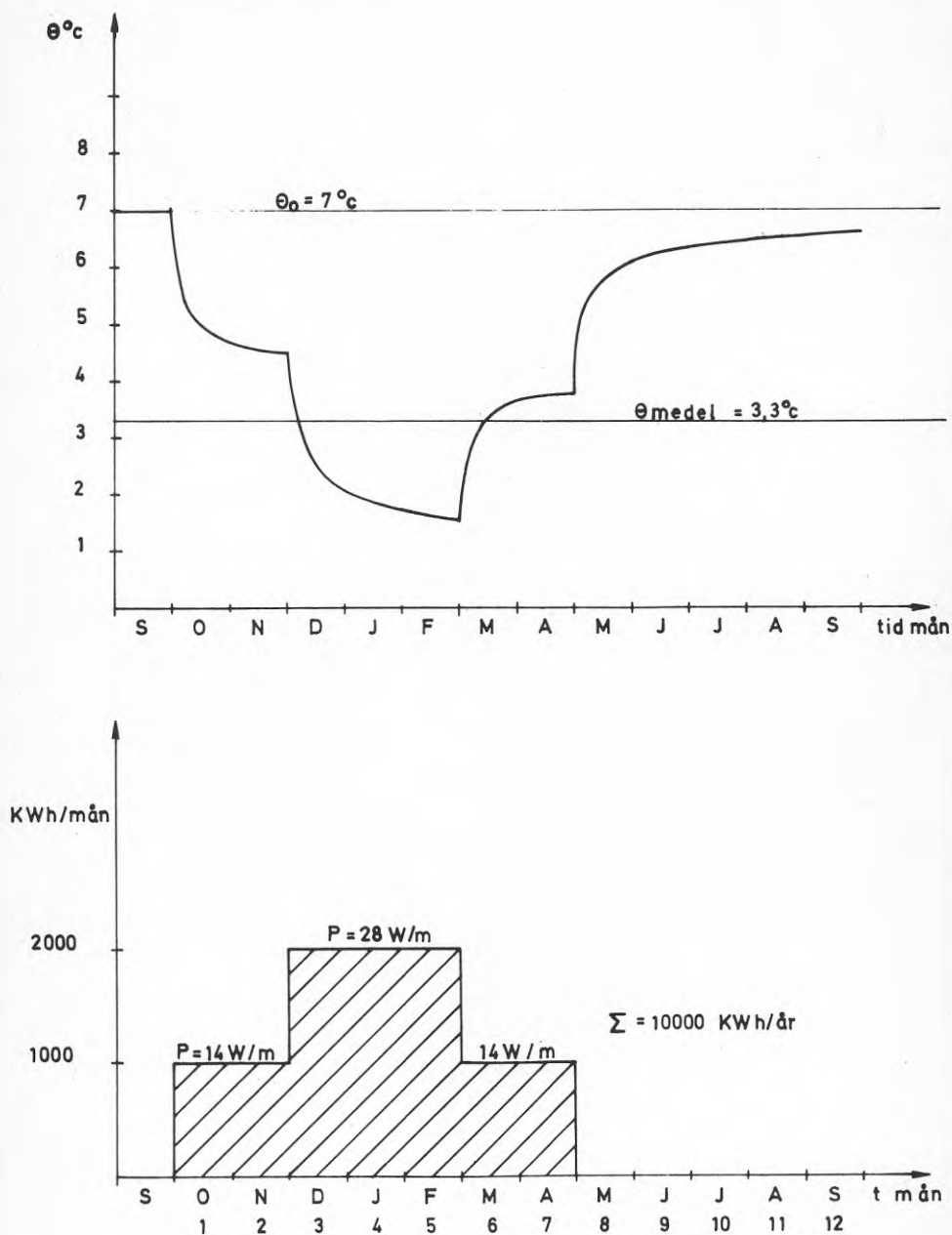


Fig 1 Månadsvis antagen energiförbrukning under ett år samt resulterande temperatur i borrhålet

Värmeövergångsförluster från borrhålsväggen till köldbärarkretsen har ej beaktats utan hela effektbehovet förutsätts kunna tillgodogöras vid borrhålsväggen.

Av figur 1 framgår temperaturen vid borrhålsväggen med det aktuella effektuttaget. Temperaturen kommer således med våra antaganden ej att underskrida nollpunkten. För att klara toppar i effektbehovet bör goda möjligheter finnas till att utnyttja isbildningsvärmets och därmed öka energiuttaget per tidsenhet.

Vid ett kontinuerligt energiuttag av 10 000 kWh/år, dvs vid stationärt tillstånd erhålls följande medeltemperatur i borrhålet med ovan nämnda antaganden:

$\theta_o = 7^\circ\text{C}$, $P = 11,4 \text{ W/m}$. Influensradien är satt till $R_o = 100 \text{ m}$.

$$\theta_{\text{medel}} = \theta_o - \frac{P}{2\pi\lambda} \ln \frac{R_o}{r_w} = 3,3^\circ\text{C}.$$

BILAGA 3 - Magasinsanalys i en berggrundsakvifer

Det är tämligen komplicerat att bestämma de geohydrologiska egenskaperna hos en uppsprucken berggrund. Orsaken är att både bergmassan och dess sprickor bidrar till permeabilitet och porositet. Bergartens totala porositet utgörs dels av en primär porositet i de ospruckna delarna, matrix, och dessutom av en hålrumsvolym i spricksystemet, den s k sekundära porositeten. I konsekvens med klassificeringen av olika porositeter föreligger alltså en primär permeabilitet i matrix och en sekundär i spricksystemet.

De hydrauliska parametrarna i en akvifer utvärderas med hjälp av en magasinsanalys. I det nedanstående redovisas kortfattat de parametrar och begrepp som bestäms genom en sådan. Beskrivningen och definitionerna är huvudsakligen hämtade från Gustafson & Andersson, 1979, "Geotermi i SV-Skåne, NE-projekt 4560062-063".

Vid en pumpning styrs avsänkningen i en brunn av flera parametrar:

$$s = f(Q, T, S, t, \xi, a_1, a_2, \dots) \quad (1)$$

Dominerande betydelse har pumpkapaciteten, Q , och formationens transmissivitet, T . Transmissiviteten är ett mått på formationens totala genomsläpplighet och kan definieras som integralen av permeabiliteten över den vattenförande delen av formationen:

$$T = \int_b K \cdot dz \text{ (m}^2\text{/s)} \quad (2)$$

Vidare är pumpningstiden, t , och formationens magasin-koefficient, S , viktiga parametrar. Magasinskoefficienten utgör den vattenmängd som kan utvinnas eller lagras per m^2 yta vid en meters sänkning eller höjning av grundvattnets trycknivå:

$$S = \frac{dV}{dh} \cdot \frac{1}{A} \text{ (m}^3\text{/m} \cdot \text{m}^2\text{)} \quad (3)$$

Vid en pumpning i ett idealt, homogent grundvattenmagasin kan avsänkningen på en godtycklig punkt i magasinet beräknas som:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \cdot \int_u^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx \quad (\text{Theis, 1935}) \quad (4 a)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (4 b)$$

För små u , d v s lång tid, t , eller på små avstånd, r , från brunnen kan funktionen med god noggrannhet approximeras med:

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \cdot 0,5 (0,8091 + \ln \frac{Tt}{r^2 S}) = \frac{Q}{2\pi T} \sigma \quad (5 a)$$

$$\sigma = 0,5 (0,8091 + \ln \theta) \quad (5 b)$$

$$\theta = \frac{Tt}{r^2 S} \quad (5 c)$$

I dessa ekvationer benämns vanligen θ dimensionslös avsänkning och θ dimensionslös tid. Ekvationen (5 a) bildar en rät linje i ett halvlogaritmiskt diagram och transmissivitet och magasinskoefficient kan under ideala förhållanden enkelt bestämmas från en graf av mätdata, se figur 1. (Cooper och Jacob, 1946).

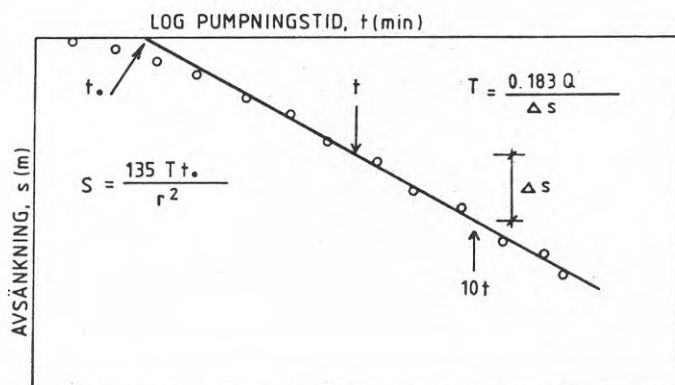


Fig 1 Utvärdering av transmissivitet och magasinskoefficient

För en uttagsbrunn måste även hänsyn tas till i hur god kontakt den står med formationen. Antingen kan borrhälsarbetena ha medfört en igensättning av borrhålsväggen (skin) eller också kan en sprickig berggrund medföra att brunnen får en större effektiv radie än den verkliga. Båda fenomenen medför en tidsberoende skillnad mellan grundvattenmagasin och brunn, se figur 2.

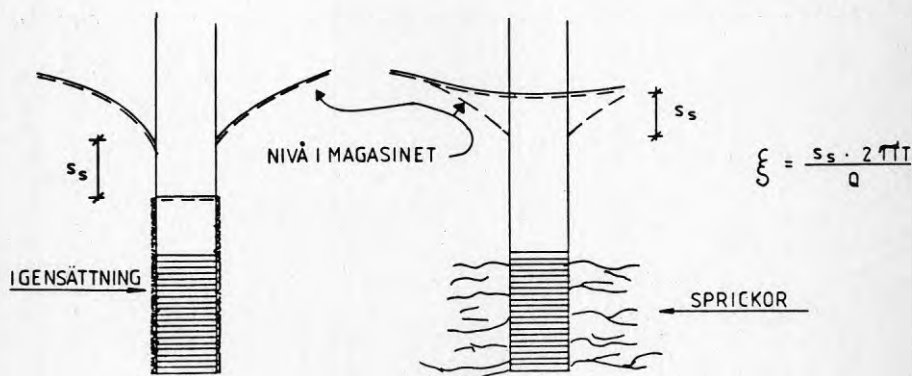


Fig 2 Avsänkningar i en uttagsbrunn vid skineffekt

Skillnaden är emellertid beroende av pumpkapaciteten och vanligtvis ställer man den i relation till transmissiviteten. Skinfaktorn definieras därför vanligen som:

$$\xi = \frac{s_s \cdot 2\pi T}{Q} \quad (\text{van Everdingen, 1953}) \quad (6)$$

Brunnens effektiva radie kan med hjälp av skinfaktorn bestämmas som:

$$r_{wf} = r_w \cdot e^{-\xi} \quad (\text{Brons och Miller, 1961}) \quad (7)$$

Om hänsyn tas till skinfaktorn kan avsänkningen i brunnen således beskrivas som:

$$s_w = \frac{Q}{2\pi T} (\sigma(\theta_w) + \xi) \quad (8)$$

Då skinfaktorn medför ett konstant tillägg eller minskning av avsänkningen medför detta att magasinskoefficienten inte går att utvärdera från en halvlogaritmisk datakurva. Denna måste således bestämmas med någon annan metod. Kurvans lutning påverkas emellertid inte, varför transmissiviteten är möjlig att erhålla.

En brunn som inte utnyttjar hela akviferen säges vara ofullständig. Som en följd av detta kommer grundvattenflödet vid uttag att konvergera mot filtret, se figur 3.

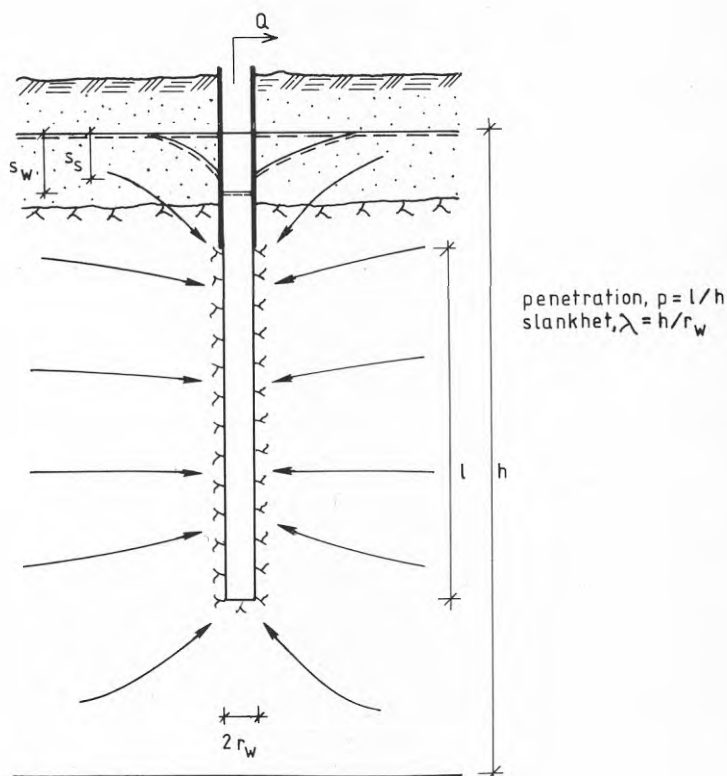


Fig 3 Flödet kring en ofullständig brunn

Genom det konvergerande flödet kommer avsänkningen i en ofullständig brunn att bli större än i en fullständig. Skillnaden är proportionell mot uttaget och konstant i tiden. Det konvergerande flödet har således samma verkan som skineffekten och kan hydrauliskt behandlas på samma sätt. Med kännedom om akviferens och brunnens geometri kan en pseudoskinfaktor beräknas, se figur 4.

Avsänkningen i brunnen blir i detta fall:

$$s_w = \frac{Q}{2\pi T} (\sigma + \xi_p) \quad (9)$$

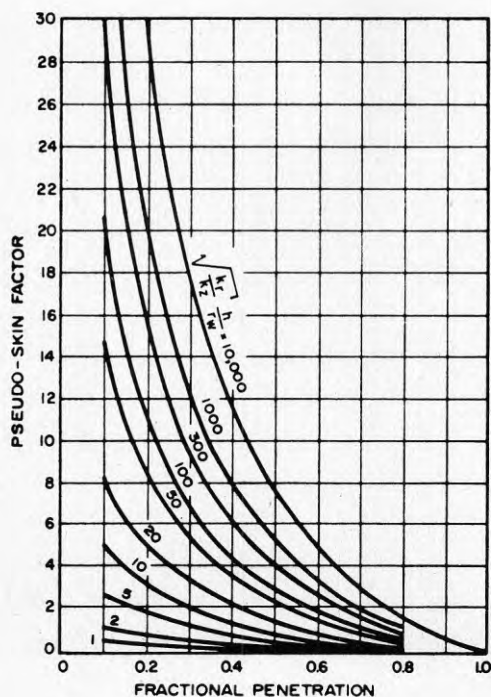


Fig 4 Pseudoskinfaktor för ofullständiga brunnar.
(Earlougher, R C Jr, 1977)

Förutom ovan angivna parametrar påverkar inre och yttre randvillkor avsänkningen. Hur dessa utvärderas tas upp i varje särskilt fall.

Vid tiden närmast efter pumpstart kommer en del av vatten att tas från brunnen. Först när avsänkningshastigheten är tillräckligt låg motsvarar flödet från akviferen den uppumpade mängden. På motsvarande vis måste brunnen fyllas vid ett pumpstopp. Tömningen av brunnen kommer att fördröja avsänkingsförloppet och kommer att medföra en förändring av den dimensionslösa avsänkingsfunktionen. (Gustafson, 1980)

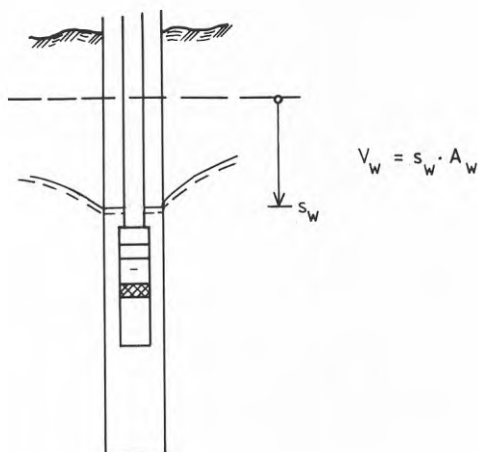


Fig 5 Definition av brunnsmagasin

Brunnsmagasinet, A_W , se figur 5, definieras som brunnens tvärsnittsarea minus stigningsledningar och dylikt. Den dimensionslösa magasinsfaktorn definieras som:

$$\gamma = \frac{A_W}{S \cdot 2 \cdot \pi r_w^2} \quad (10)$$

I figur 6 redovisas den dimensionslösa avsänkningen för olika värden på brunnsmagasinsfaktorn. Som framgår av figuren börjar samtliga kurvor med en rät linje med lutningen 1:1. Under denna tid dominerar inflytandet av brunnsmagasinet och den dimensionslösa magasinsfaktorn kan bestämmas om:

$$A_w = \frac{Q \cdot t_i}{s_i} \quad (\text{Ramey, 1967}) \quad (11)$$

I denna ekvation är t_i och s_i två godtyckliga koordinater på avsänkningsskurvan. Vidare ansluter kurvans högra del till den dimensionslösa avsänkningen, beräknad utan brunnsmagasin. Den dimensionslösa tiden när passning mot Theis lösning är tillåten kan därför uppskattas som:

$$\theta > (60 + 3,5 \xi) \cdot \gamma \quad (\text{Gladfelter et al, 1955}) \quad (12)$$

I ovanstående ekvation är skinfaktorn definierad enligt ekvation 6.

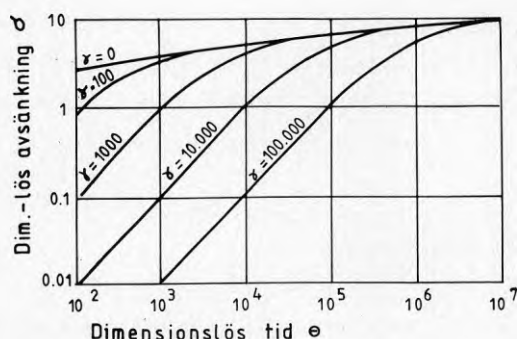


Fig 6 Dimensionslös avsänkning med hänsyn till brunnsmagasinet (Wattenbarger och Ramey, 1970)

Referenser:

- Brons, F and Miller, W C, 1961. A Simple Method for Correcting Spot Pressure Readings - J Pet Tech (Aug 1961)
- Cooper, HH Jr and Jacob, C E, 1946. A Generalized Graphical Method for Evaluating Formation Constants and Summarizing Well-Field History - Transactions American Geophysical Union, Vol 27, pp 526-534 (1946)
- Earlougher, RC Jr, 1977. Advances in well test analyses - Monograph Vol 5, Henry L Doherty Series SPE, Dallas 1977
- van Everdingen, AF, 1953. The Skin Effect and Its Influence on the Productive Capacity of a Well - Trans AIME (1953) 198, 171-176
- Gladfelter, R E, Trycy, GW and Wilsey, LE, 1955. Selecting Wells Which Will Respond to Production-Stimulation Treatment - Drill and Prod Prac, API (1955) 117
- Gustafson, G & Andersson, O, 1979. Geotermi i SV-Skåne. Uppborrning och provpumpning av Höllviksnäs 1. Slutrapport. NE-projekt 4560 062-063. VIAK, Malmö 1979
- Gustafson, G, 1980. Brunnsteknik (koncept) BFR-rapport under arbete
- Ramey, HJ Jr, 1967. Non-Darcy Flow and Wellbore Storage Effects in Pressure Build-up and Drawdown of Gas Wells. Reprint Series, No 9 - Pressure Analysis Methods, Society of Petroleum Engineers of AIME, Dallas 1967.

Theis, CV, The Relation between the Lowering of the Piezo-
metric Surface and the Rate and Duration of Discharge
of a Well Using Groundwater Storage - Transactions
American Geophysical Union, Vol 16, pp 519-524 (1935)

Wattenbarger, RA & Ramey, HJ Jr, 1970. An Investigation
of Wellbore Storage and Skin Effect in Unsteady
Liquied Flow:II. Finite Differens Treatment. Soc
Pet Eng S AI ME, 249, 1970.

**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
790787-7 från Statens råd för byggnadsforskning
till VIAK AB, Vällingby.**

R172: 1980

ISBN 91-540-3418-3

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6700272

**Abonnemangsgrupp:
W. Installationer**

**Distribution:
Svensk Byggtjänst, Box 7853
103 99 Stockholm**

Cirka pris: 20 kr exkl moms